

CARACTERIZACION ELECTROQUIMICA DE UNA FUNDICIÓN GRIS

ERIKA YULIE QUICENO VALLE

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALOGRAFIA
PEREIRA

2017



CARACTERIZACION ELECTROQUIMICA DE UNA FUNDICIÓN GRIS

ERIKA YULIE QUICENO VALLE

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FORMATIVA

ING. JOSE LUIS TRISTANCHO REYES, M.Sc., Ph.D.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALOGRAFÍA
PEREIRA

2017



Pereira _ de _ de 2017

Nota de aceptación:

Firma del director del proyecto

Firma del jurado



CONTENIDO

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

RESUMEN

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Naturaleza del problema

CAPITULO 2. METODOLOGIA Y EXPERIMENTOS

2.1 Metodología

2.1.1 Resistencia de polarización

2.2 Experimentos

2.2.2 Resistencia a la polarización lineal (PRL)

2.2.3 Preparación de probetas

2.2.4 Medición de las pruebas de resistencia de polarización (curvas de polarización)

2.2.5 Determinación de la velocidad de corrosión

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis de las mediciones de resistencia de polarización lineal

3.2 Análisis de las mediciones de curvas de polarización

3.3 Análisis estadístico

CAPITULO 4. CONCLUSIONES

CAPITULO 5. RECOMEDACIONES

APENDICE

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes componentes químicos de la Fundición Gris

Tabla 2. Resultado obtenido para la determinación de la velocidad de corrosión

Tabla 3. Resultados obtenidos para determinación de la velocidad de corrosión



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la celda de polarización empleado para la técnica de resistencia de polarización lineal, bajo el sistema de tres electrodos

Figura 2. Probeta o electrodo de trabajo (ET) montada en resina epóxica

Figura 3. Montaje de las probetas en la celda de polarización

Figura 4. Software utilizado para la grabación y evaluación de los datos.

Figura 5. Potenciostato/Galvonostato

Figura 6. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 0 horas

Figura 7. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 24 horas



LISTA DE ANEXOS

Figura 11. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 0 horas.

Figura 12. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 24 horas.

Figura 13. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 48 horas.



RESUMEN

El presente trabajo tiene como fin emplear la técnica de Resistencia a la polarización lineal (RPL) para la medición de la velocidad de corrosión en una fundición gris utilizando una solución de NaCl al 3.5%, realizar el análisis matemático de las mediciones de Resistencia a la polarización lineal en potencial y corriente resultantes, y comprobar la validez del empleo de medias cada n número de datos adquiridos para efectuar el cálculo de la resistencia polarización (R_p).

Con la técnica de RP se obtuvieron las curvas de polarización en las cuales se puede observar que el intervalo de pasividad es mayor para las ultimas graficas en comparación con las primeras, así como evidencia experimental de la formación de corrosión por picaduras, también se obtuvieron los parámetros necesarios para la ecuación de Stern-Geary y con ello, se determinó la velocidad de corrosión. Con la técnica de RP se obtuvieron los espectros temporales de potencial y corriente en los cuales se puede observar la presencia de tránsitos característicos de un proceso de corrosión por picaduras. Con los datos adquiridos durante el ensayo se realizaron promedios cada n número de datos para después calcular las desviaciones estándar de potencial y corriente, y determinar el valor de R_p , encontrándose que el uso de estos promedios ocasiona errores, ya que entre mayor sea la cantidad de datos que se utilicen para hacer el promedio mayor será R_p . Se encontró una dependencia entre el número de datos para la media y R_n de tipo potencial con la cual es posible corregir el valor de R_n como si fuese calculado con el número total de datos adquiridos en el ensayo.



1. INTRODUCCIÓN

La fundición gris más conocida como hierro fundido es una aleación muy utilizada en la ingeniería por su relativo bajo costo y buena maquinabilidad, tiene buena resistencia al desgaste, baja ductilidad y tenacidad, tiene mucha resiliencia. Este metal como cualquier otro existente (oro, plata, cobre, aluminio) esta comúnmente en interacción a la acción de la atmosfera la cual se sabe está compuesta por un 78% de nitrógeno y un 21% de oxígeno del total, el nitrógeno es un gas que casi no reacciona con ninguna sustancia, por lo contrario, el oxígeno es un gas muy reactivo, que al combinarse con el calor y la humedad aumenta la posibilidad de oxidación, el calor con el oxígeno produce la oxidación de los metales y la humedad con el oxígeno produce la corrosión, estos procesos son completamente distintos pero se pueden usar protecciones similares. [1] De forma evidente en la actualidad se observan serios y veloces deterioros estructurales al hierro, acero, especialmente en ambientes de alta humedad relativa y acción constante del viento a causa de los cloruros disueltos en el aire.

El ejemplo más común son las zonas costeras en donde las condiciones son perfectas para promover el fenómeno de la corrosión electroquímica y las zonas donde existe variedad de actividad industrial (química y petroquímica), es por ello la necesidad de estudiar estos fenómenos de corrosión.

La corrosión se define como un proceso destructivo que ocasiona un deterioro en el material como resultado de un ataque químico provocado por el medio al que está expuesto. La forma más común en la que se presenta la corrosión en los metales es por medio de un ataque electroquímico [14]. En la mayor parte de los procesos industriales se ve involucrado el transporte de fluidos de diferente naturaleza, es así como piezas que están expuestas a la acción de estos fluidos pueden presentar procesos de corrosión dinámica disminuyendo de manera acelerada su vida útil. Actualmente los recubrimientos duros tales como los nitruros basados en metales de transición depositados mediante técnicas como la deposición física de vapor y sobre diversos sustratos de acero, se están convirtiendo en la solución de muchos problemas de ingeniería y entre ellos la corrosión, debido a su inercia química. Entre los nitruros mencionados tenemos el nitruro de titanio (TiN) que



depositado como monocapa mantiene una posición dominante en el campo de los recubrimientos duros para mejorar la resistencia al desgaste de herramientas de corte en mecanizado de alta velocidad [15]. Sin embargo, este material binario mantiene una limitada resistencia a la oxidación a temperaturas por encima de 600°C donde se forma una capa de Óxido de Titanio (TiO_2). Debido a la gran diferencia de volúmenes molares entre el TiO_2 y el TiN , se desarrollan tensiones compresivas en la capa de óxido lo que resulta en delaminación y en la exposición del nitruro no oxidado para nueva oxidación. El mejor ejemplo conocido de mejoramiento de las propiedades por la inclusión de un tercer componente es el llamado Nitruro de Titanio Aluminio (TiAlN), la incorporación de átomos de Aluminio (Al) dentro de la estructura cristalina del Nitruro de Titanio (TiN) no solo incrementa la resistencia a la oxidación por medio de la formación de una capa estable y compacta en la superficie sino que también contribuye a un significativo incremento en la dureza en comparación con el Nitruro binario simple [16]. En los últimos años, se han realizado considerables esfuerzos para desarrollar recubrimientos multicomponentes como heteroestructuras en multicapas con el fin de mejorar la resistencia al desgaste y la oxidación de los componentes recubiertos. Las mejoras se presentan en la deposición alternada de dos (o más) capas químicas y/o mecánicamente diferentes, de tal forma que la concentración de tensiones y las condiciones para la propagación de nano-grietas pueda ser controlada. Por lo tanto, la estructura de multicapas puede actuar como inhibidor de nano-grietas, además incrementar la resistencia a la fractura [17].

La fundición gris es el tema central de la presente investigación, la microestructura del material con el antes y el después, el ataque corrosivo y los valores de velocidad de corrosión al someter la fundición gris en una solución de NaCl al 3.5% W durante 24, 48, 72 y 96 horas en la evaluación, por teoría básica de corrosión, se sabe que para poder predecir la velocidad de corrosión de un sistema, se deben conocer las curvas de polarización (relación i vs E) de cada una de las reacciones electroquímicas que lo componen, por lo que la determinación y estudio de las curvas de polarización es de fundamental importancia en los trabajos de corrosión. Las curvas de polarización pueden ser galvanostáticas o potencioestáticas.

De la corrosión electroquímica se utilizan diversas técnicas, dentro de las cuales tenemos las técnicas electroquímicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Curvas de Polarización (CP).



La primera de estas técnicas es la técnica de Resistencia de polarización (RP), esta consiste en hacer pasar a través de un determinado metal una cierta cantidad de corriente directa mediante una fuente de poder externa y observar el cambio de potencia con respecto a un electrodo de referencia, que se registrara mediante un voltímetro. La RP nos permite conocer la velocidad con que se lleva acabo el fenómeno de corrosión.

La segunda técnica electroquímica son las Curvas de polarización (CP), para esta se polariza un electrodo en sentido anódico y luego en sentido catódico para obtener pares de valores de corriente y potencial. Estas curvas nos permiten determinar si un metal es susceptible a la corrosión uniforme o al ataque localizado.

Analizando las posibles consecuencias y proponiendo una relación valida que ayude a encontrar los valores en que aumenta la corrosión; y como objetivos específicos se ha planteado:

1. Adecuación y puesta a punto de la celda electroquímica y del potencióstato/galvanostato para la realización de cuatro ensayos electroquímicos de corrosión.
2. Obtención de los valores de las pendientes anódicas, catódicas y de la constante de Tafel mediante la técnica electroquímica de Curvas de Polarización al someter una fundición gris a ataque corrosivo en una solución de NaCl al 3.5% W después de 24, 48, 72 y 96 horas de exposición.
3. Determinación de las velocidades de corrosión presentados por una fundición gris expuesta a ataque corrosivo severo en una solución de NaCl al 3.5% W después de 24, 48, 72 y 96 horas, mediante Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).
4. Determinar el tipo de corrosión presentada por la fundición gris después de ser expuesta a ataque corrosivo por solución de cloruro de sodio al 3.5% en peso.

La estructura presentada en este trabajo es la siguiente:

En el ítem 2.1 se describe las características de la corrosión y los métodos utilizados, como surgieron y su aplicación en los estudios relacionados con fenómenos de corrosión. En el ítem 2.2 se detalla la parte experimental, el diseño y elaboración de las probetas, así como las condiciones o parámetros para la realización de las pruebas. En el ítem 3 se establece los resultados obtenidos, el análisis, y los cálculos matemáticos de los datos. Por último, se presentan las conclusiones.



2. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

2.1 Metodología

El material, que es el tema central de este trabajo es la fundición gris. A fin de evaluar y determinar los valores de las velocidades de corrosión, pendientes anódicas, catódicas y las constantes de Tafel se hará uso del equipo Potenciostato/Galvanostato del grupo de investigación en materiales avanzados GIMAV-UTP. Para las velocidades de corrosión y las curvas de polarización se empleará una celda de polarización.

La tabla 1. Presenta los porcentajes de componentes químicos que contiene la fundición gris.

Clase de fundición		Composición en %				
		C	Si	Mn	P	S
Gris	Corriente	2,50-4,00	1,00-3,80	0,40-1,00	0,05-1,00	0,05-0,25
	Alta resistencia	2,80-3,30	1,40-2,00	0,50-0,80	0,05-0,15	0,05-0,12

Tabla 1. Porcentajes componentes químicos de la fundición gris

Se colocarán las probetas en una solución acuosa alcalina de NaCl al 3.5%W. La celda electroquímica está compuesta de tres electrodos: un contra electrodo de platino, un electrodo de referencia de grafito y el electrodo de trabajo corresponderá en cada prueba a una muestra de fundición gris. Todos los potenciales mostrados estarán referidos al potencial del electrodo de referencia. Una vez realizados los ensayos se obtendrán las curvas de polarización después de 24, 48, 72 y 96 horas de exposición de la muestra en la celda. Las curvas de polarización se darán en los valores de potencial y de densidad de corriente de corrosión. Los valores de velocidad de

corrosión se calcularán a partir de la curva de polarización anódica mediante la determinación de las pendientes de Tafel y el valor de densidad de corriente de corrosión.

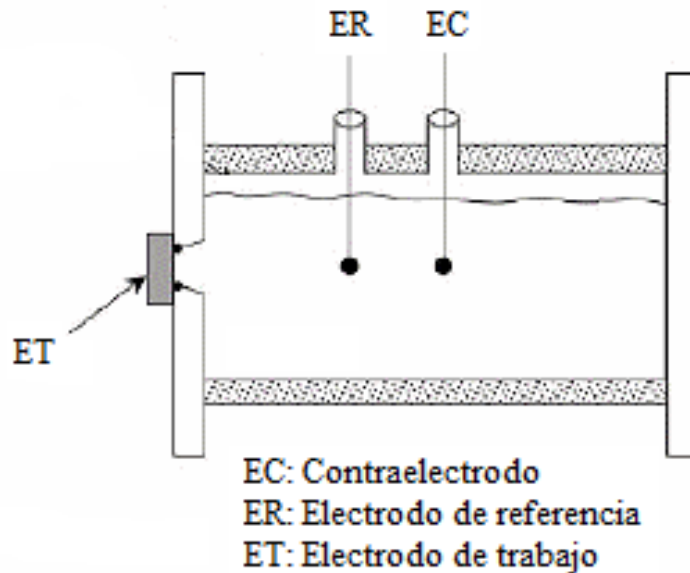


Figura 1. Esquema de la celda de polarización empleado para la técnica de resistencia de polarización lineal, bajo el sistema de tres electrodos

Para realizar un estudio experimental de resistencia a la polarización, es conveniente acudir a la norma ASTM G 59-91. De acuerdo a la norma se deben seguir los siguientes pasos:

- Usar un puente salino que acerque el electrodo de referencia a 2 o 3 mm de la superficie del electrodo de trabajo.
- Registrar el potencial de corrosión después de 5 minutos.
- Aplicar un potencial de 30 mV más negativo que el potencial registrado.
- Un minuto después de que se aplique el potencial, se inicia un barrido en dirección anódica a 0.6 V/h (10mV/min), registrado el potencial y la corriente continuamente.
- Terminado el barrido cuando se alcanza un valor de 30 mV más positivo que el potencial de corrosión
- Graficar la curva de polarización
- Determinar gráficamente la resistencia a la polarización, R_p , como la tangente a la curva en el origen de la gráfica ($\Delta E=0$). [4]



Las curvas de polarización nos aportan más información, si el metal es susceptible a la corrosión, si se trata de materiales pasivables, permite conocer la velocidad instantánea de la corrosión. Posteriormente de verificar un cambio en la pérdida de peso del material y su velocidad de corrosión.

La corrosión electroquímica es la forma más común de ataque a los metales. Ésta se presenta cuando se produce el contacto de un metal con medios líquidos conductores que contienen agentes oxidantes [2,3]. Estos procesos se caracterizan porque el metal que se corroe se comporta como un polielectrodo [2], es decir, sobre distintos puntos de la superficie metálica se verifican simultáneamente y a la misma velocidad. A estas dos reacciones se les asignan nombres de proceso anódico, para la oxidación del metal, y proceso catódico, para la reducción del agente oxidante presente en el medio corrosivo.

Como los fenómenos de corrosión implican reacciones redox que se verifican en la interfase metal/electrolito. Este tipo de procesos conlleva un movimiento de cargas eléctricas. De esta manera, el estudio de los fenómenos de corrosión puede abordarse mediante distintas técnicas electroquímicas que permitan evaluar los parámetros eléctricos asociados a esos procesos de transporte de cargas.

La mayor parte de los métodos electroquímicos para el estudio de la corrosión están basados en la perturbación controlada de una de las dos variables eléctricas fundamentales, voltaje o corriente, y la medición de la otra variable como consecuencia de la alteración introducida al sistema. El comportamiento de la respuesta en el tiempo depende, por una parte, de las características de la señal de perturbación, y por otra de las características eléctricas del sistema. Haciendo uso de estos métodos es posible estimar la velocidad de corrosión y, además, extraer información adicional sobre las características del sistema difíciles de obtener mediante otras técnicas experimentales [4,5].

Dentro de estas técnicas, las más empleadas son la de polarización lineal (PL), resistencia de polarización (RP), voltametría cíclica (VC), e impedancia electroquímica (IE).



2.1.1 Resistencia de polarización

Esta técnica está basada en la medida de la relación existente entre el potencial y la densidad de corriente en estado estacionario, excitando el sistema mediante señales de corriente continua. El objetivo de esta técnica es determinar las curvas de Tafel del sistema, ya que sus pendientes están relacionadas con la velocidad de corrosión [7, 8].

Desde que en 1957 Stern y Geary [6, 7, 8] dieron forma al método, la medida de la resistencia de polarización ha sido la técnica que más ha contribuido al avance de la ciencia de la corrosión. Estos autores propusieron la denominada ecuación de Stern-Geary, en la que se establece una correlación entre la resistencia de polarización (R_p) y la velocidad de corrosión,

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} \text{ (Ec. 4)}$$

donde i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión y B está relacionada con las pendientes anódica (β_a) y catódica (β_c) de Tafel del sistema, a través de la expresión:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 (\beta_a + \beta_c)} \text{ (Ec. 1)}$$

Debido a la gran cantidad de estudios que se han realizado aplicando este método, existen estándares internacionales que se desarrollaron con el fin de facilitar su aplicación, como es el caso del estándar de la ASTM G3-89 (Standard practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing) [9].

Algunos autores encontraron que estas aleaciones presentan una buena resistencia a la corrosión, que las curvas de polarización mostraron un control anódico por pasivación, así como la formación de perturbaciones características de picaduras metaestables en la zona de pasividad de las curvas.



El método de resistencia a la polarización puede ser derivado de la teoría del potencial mixto, las curvas experimentales de polarización pueden obtenerse de la siguiente ecuación;

$$i_{app, c} = i_c - i_a$$

Donde i_c es la densidad de corriente para la reacción de reducción catódica, i_a es la densidad para la reacción de oxidación anódica, y $i_{app, c}$ es la densidad de corriente catódica aplicada, todas al mismo potencial E. De manera similar, la densidad de corriente anódica aplicada, $i_{app, a}$, viene dada por:

$$i_{app, a} = i_a - i_c$$

Al polarizar el potencial de corrosión, E_{corr} con las densidades de corriente anódica y catódica aplicada i_a y i_c , donde β_a y β_c son las constantes de tafel catódica y anódica respectivamente, y i_{corr} es la densidad de corrosión.

Por lo tanto, la pendiente definida en el origen de la curva de polarización, se define como R_p y es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 (\beta_a + \beta_c)} \quad (\text{Ec. 1})$$

La constante B sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel.

La velocidad de corrosión se determina con la siguiente ecuación:

$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{PE}{D} \times i_{corr} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde,

V_{corr} =Velocidad de corrosión (mpy)

PE=peso equivalente

D=densidad (g/cm³)

i_{corr} =Densidad de corrosión (A/cm²)

Para encontrar el peso equivalente de una aleación necesitamos determinar el número equivalente N^{1eq} , el cual resulta de separar las unidades de masa de la aleación.



$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{f_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right) \text{ (Ec. 3) [10].}$$

Donde:

f_i : Fracción de masa (g)

n_i : Intercambio de electrones

a_i : Peso atómico (g)

2.2 Experimentos

2.2.1 Materiales

Con el propósito de evaluar la velocidad con la que se corroe el hierro fundido expuesto a solución de cloruro de sodio (NaCl), se utilizó fundición gris, esta aleación ferrosa contiene en general más de 2% de carbono y más de 1% de silicio, además de manganeso, fósforo y azufre [11]. Se empleó una concentración de 3.5% en peso de cloruro de sodio, esta es la concentración máxima que se puede encontrar de forma natural en el ambiente.

2.2.2 Resistencia a la polarización lineal (PRL)

En esta técnica se utilizó el equipo Potenciostato/Galvanostato del grupo de investigación en materiales avanzados GIMAV-UTP, sistema de tres electrodos (figura 1.). Este dispositivo consistió en el empleo de un electrodo de trabajo del material a estudiar (ET), un electrodo auxiliar de platino o contra electrodo (EC) y un electrodo de referencia de grafito (ER)

2.2.3 Preparación de las probetas

Las probetas o electrodos de trabajo (ET) se cortaron de una placa de fundición gris de alta resistencia. Sus dimensiones fueron 0.9 x 1.4 cm y un peso de 13.5812 g.

Seguidamente se procedió a preparar la forma de cómo realizar las conexiones en la probeta. Para esto se adhirió un alambre conector de cobre soldado con bronce.

Una vez adherido el alambre se procedió a montarlas en resina epóxica, de tal manera que las probetas quedaran centradas y aisladas, la resina se preparó con catalizador en un molde de tubo PVC engrasado previamente.

Para finalizar se pulieron las probetas a mano, las lijas utilizadas fueron de carburo de silicio con tamaño de grano 80, 100, 220, 400, 600, 1000. Las probetas quedaron como se muestra en la figura 2.

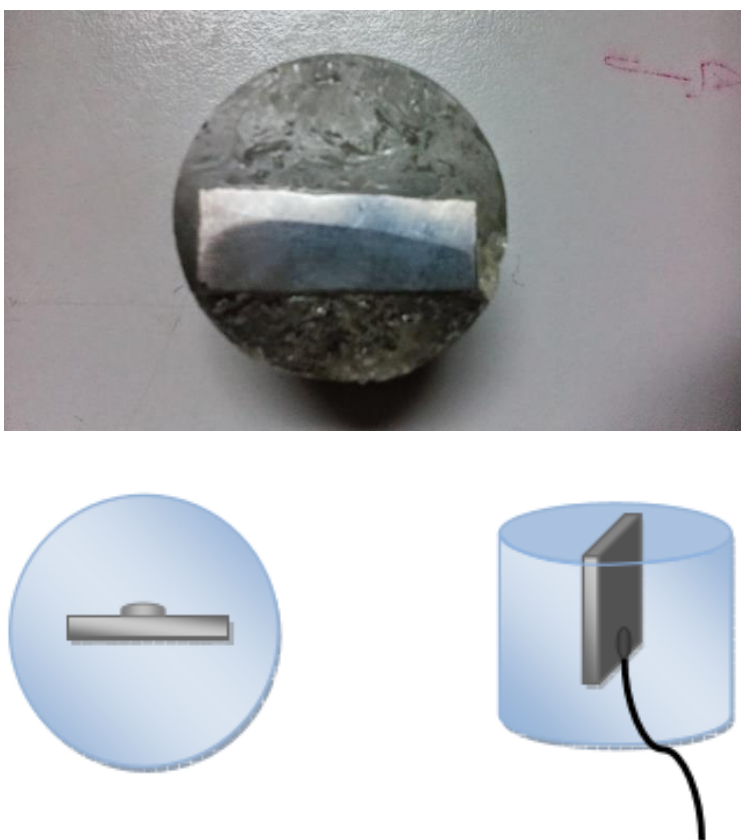


Figura 2. Probeta o electrodo de trabajo (ET) montada en resina epóxica

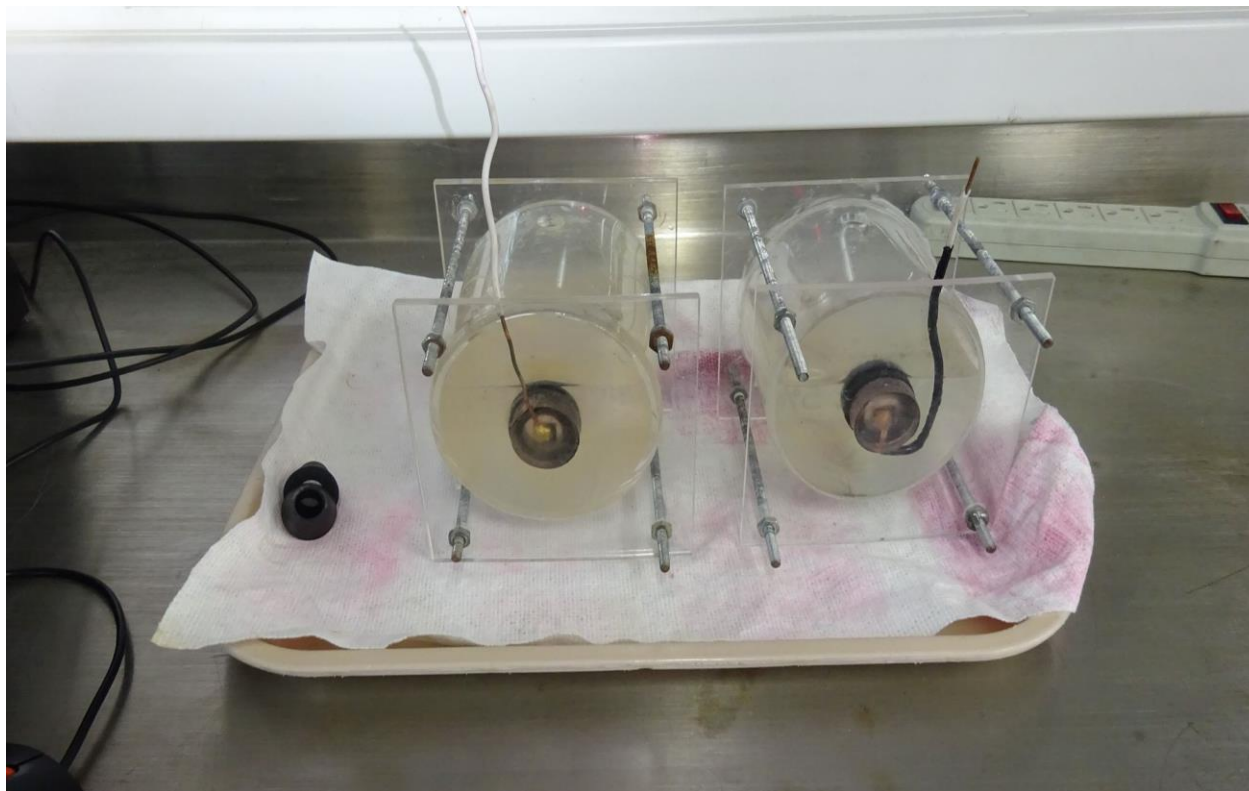


Figura 3. Montaje de las probetas en la celda de polarización

2.2.4 Medición de las pruebas de resistencia de polarización (Curvas de polarización)

Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, exponiendo la fundición gris a los electrolitos de cloruro de sodio en concentración de 3.5% en peso, preparadas con agua mineral.

Para obtener los valores de resistencia a la polarización, se realizó primero un barrido de prueba de potencia y medir su respuesta de corriente, en un intervalo de -600 a -1000 mV a una velocidad de barrido de 10 mV/s. Con esto se logró determinar el potencial de corrosión de los aceros, y observar por medio de estas curvas cual era el comportamiento de los aceros en estos medios electrolíticos.

Una vez encontrado este potencial y de acuerdo a las normas ASTM se procedió a determinar las curvas de Tafel, realizando un barrido de +/- 795 mV, con una velocidad de barrido de 10 mV/s. Las pendientes de las curvas se tomaron en los intervalos -805 a -785 mV a partir de la potencia de corrosión y cambiando dependiendo del tiempo estimado para cada prueba. Asimismo, se



determinó el valor de la pendiente de la curva de R_p realizando un barrido de ± 700 mV a partir del potencial de corrosión.

La instrumentación utilizada para el desarrollo de las pruebas de resistencia de polarización consistió en un Potenciostato/Galvonostato PG-TELCORR 4.2 USB, así como el software PG TEKCORR 4.2.1, para la grabación y evaluación de los datos electroquímicos.



Figura 4. Software utilizado para la grabación y evaluación de los datos.



Figura 5. Potenciostato/Galvonostato

Para la medición de las pruebas se consideraron las normas ASTM G5-94, “Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements” [12] y ASTM G59-97, “Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements” [13].

2.2.5 Determinación de la velocidad de corrosión

Para la determinación de la velocidad de corrosión se basó en los datos obtenidos de las pruebas hechas a las probetas con la técnica de Resistencia a la polarización lineal (RPL).

La velocidad de corrosión (CR) se calculó como se definió en la ecuación 2, empleando los valores de la constante k expresados en la Tabla 1, de acuerdo a lo explicado en el ítem 2.1.



3. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados experimentales y su análisis siguen la siguiente secuencia: en primer lugar, se presenta el análisis de los resultados obtenidos por la técnica resistencia de polarización lineal, se hace un análisis para cada uno de los tiempos establecidos. Y, en segundo lugar, se hace un análisis de los resultados obtenidos por la técnica de curvas de polarización.

3.1Análisis de las mediciones de resistencia de polarización lineal

Para este punto se analizan los parámetros obtenidos de las curvas de polarización de la fundición gris. El análisis de estos parámetros se realiza a partir de los datos obtenidos en los periodos e intervalos descritos en el capítulo 2.

Una vez realizados los ensayos con la misma concentración de cloruro de sodio, temperatura ambiente y los distintos tiempos de espera se trazaron las curvas de polarización del material a trabajar, las cuales se muestran en el apéndice A.

En general, la fundición gris presenta una buena resistencia a la corrosión gracias a su amplia zona de pasividad, pero a pesar de esto es susceptible a la corrosión por picadura.

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos para la determinación de la velocidad de corrosión de estos ensayos; de acuerdo con lo explicado anteriormente y conforme a lo establecido por la ASTM.



Pruebas	B (mV)	Corriente de corrosión (A)	Resistencia a la polarización (OHM)	Velocidad de corrosión (MPY)
0 horas	-791	45,44 m	261,66	9,01 k
24 horas	-781	36,51 u	337,76	7,24 k
48 horas	-782	25,66 m	255,04	5,09 k
72 horas	-795	19,12 m	221,12	3,79 k
96 horas	-944,59	6,03 u	243,43	3,34 k

Tabla 2. Resultados obtenidos para la determinación de la velocidad de corrosión

De los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de resistencia de polarización, y como puede observarse en la tabla 2, la fundición gris estando en contacto con cloruro después de transcurrir 96 horas presenta la velocidad de corrosión más baja. Por tanto, es recomendable el empleo de fundición gris para condiciones o ambiente con contenidos de cloruros similares a los utilizados para este estudio, debido a que a medida que pasa el tiempo presenta una mayor resistencia a la corrosión.

3.2 Análisis de las mediciones de curvas de polarización

Se presentan las curvas de polarización de las mediciones realizadas, para la obtención de las pendientes de Tafel.

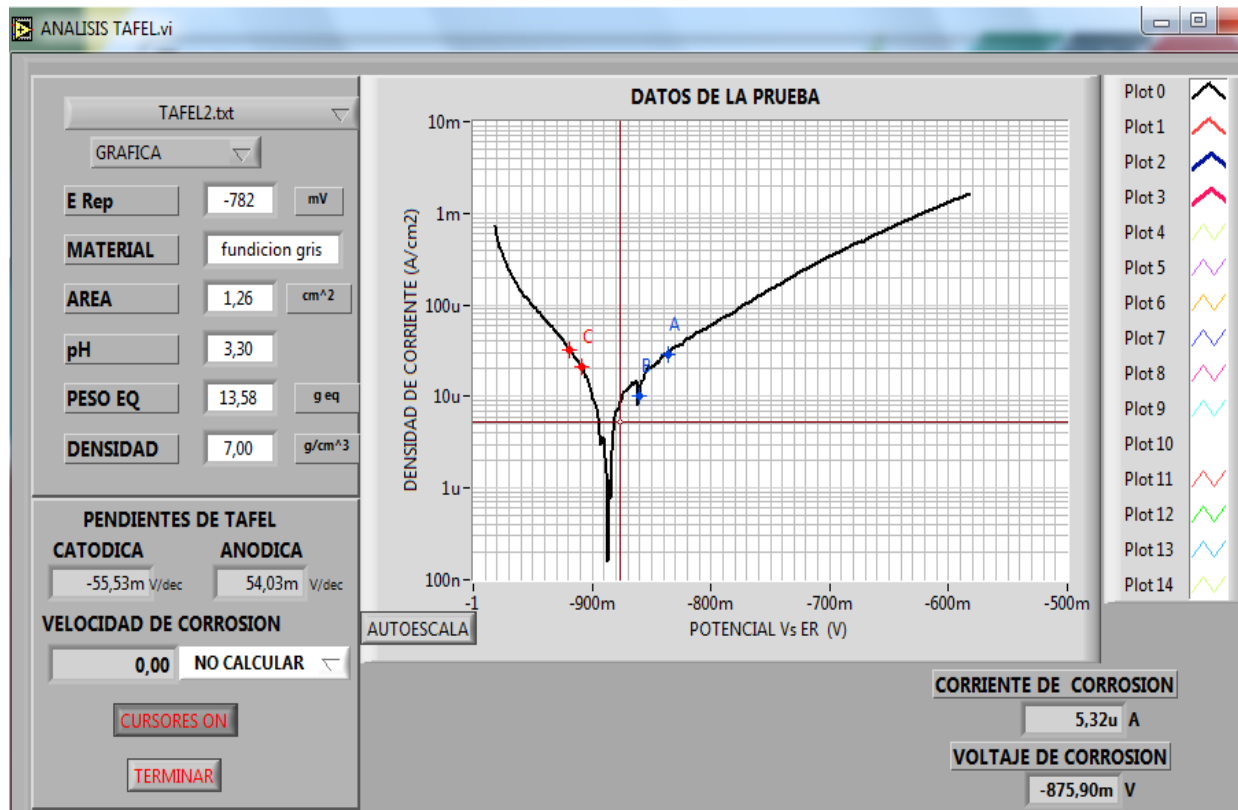


Figura 6. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 0 horas

Al observar la figura 6. Se aprecia por ser esta la inicial en 0 horas una zona de acción, no muy típica de esta aleación, la cual oscila entre los -1 y -900 mV. También, se observa la formación de pequeñas oscilaciones en la zona entre -900 y -800 mV; las cuales son originadas por la formación de picadura metaestable.

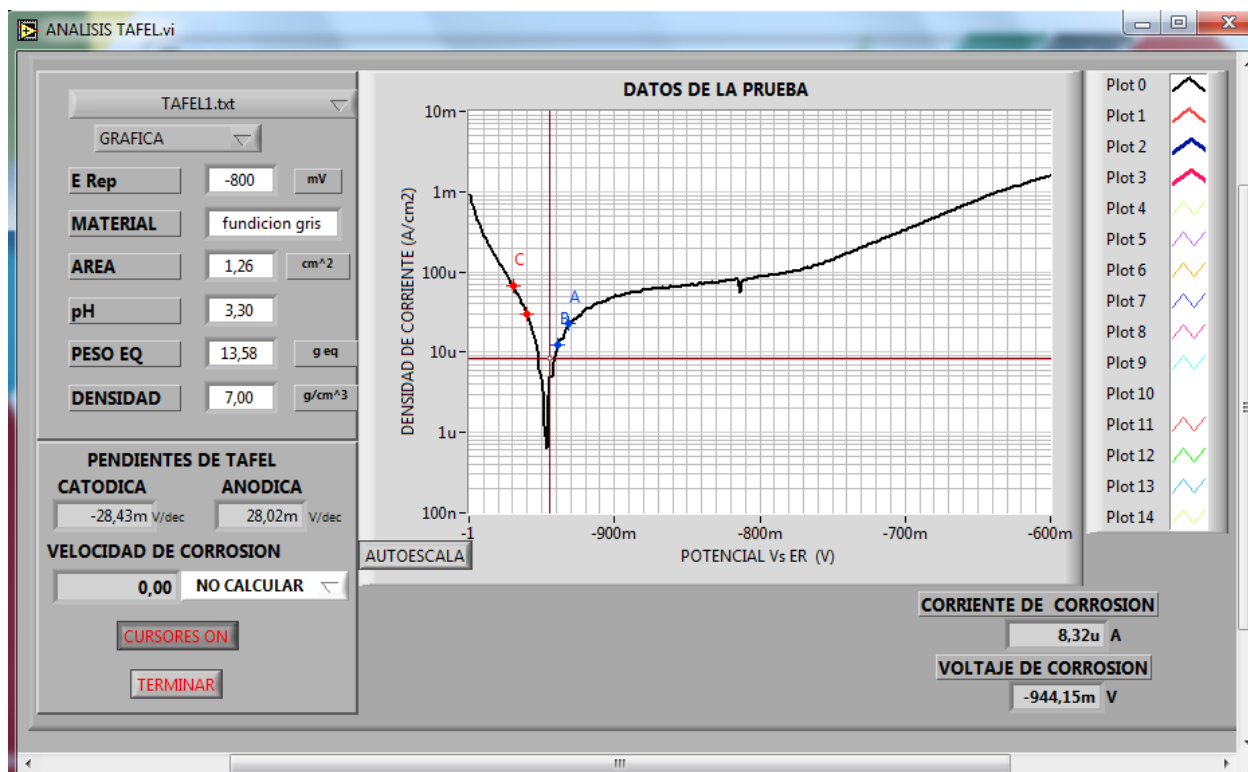


Figura 7. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 24 horas.

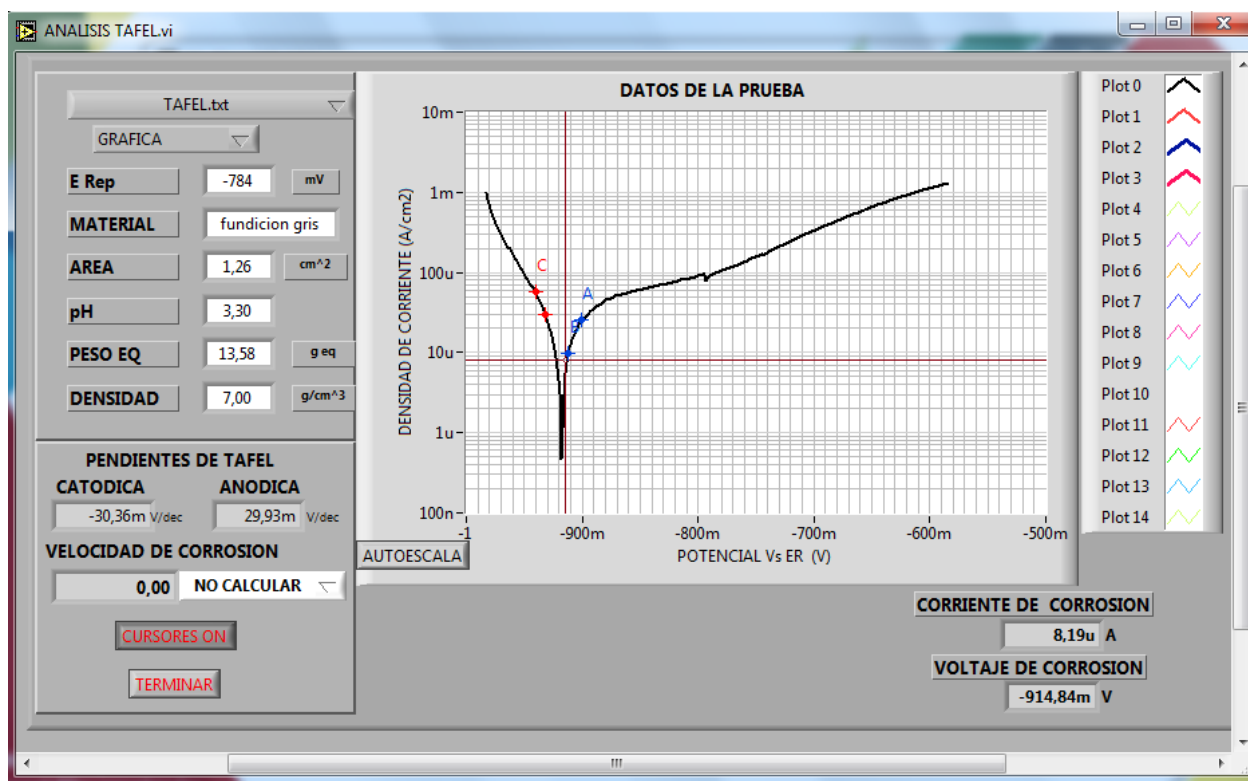


Figura 8. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 48 horas.

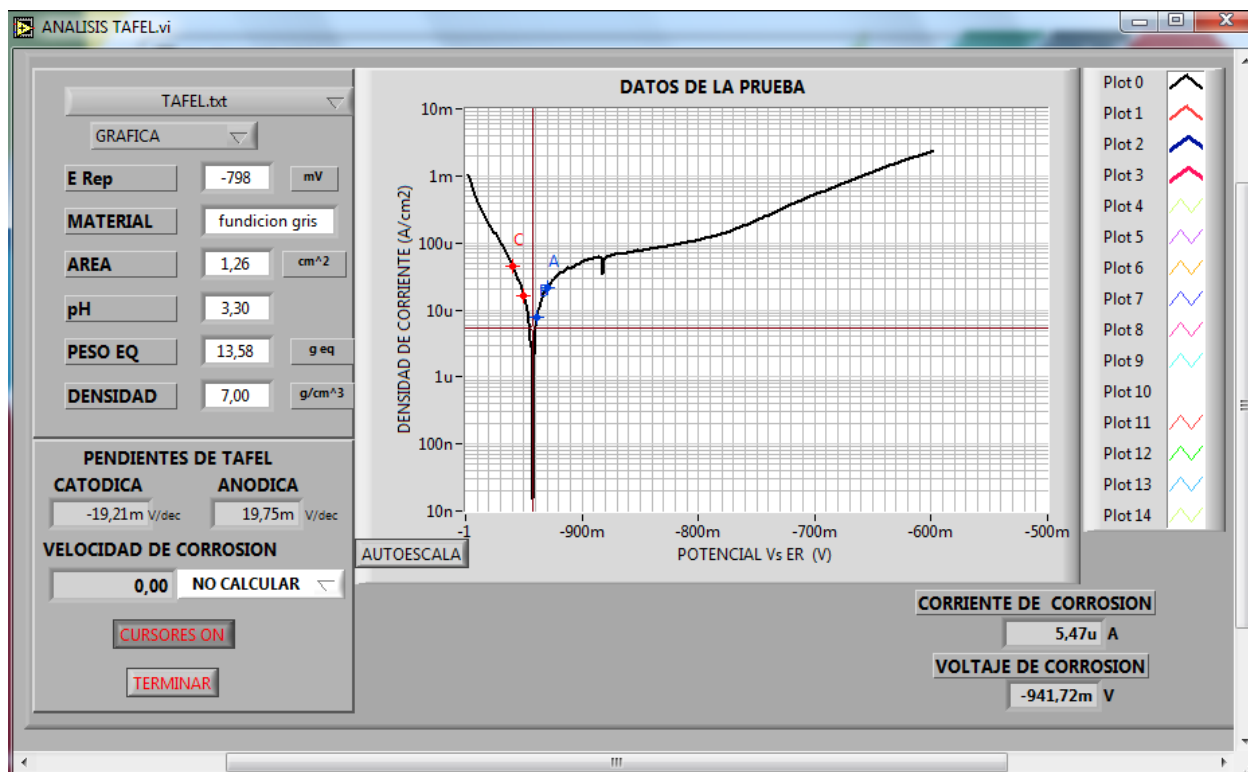


Figura 9. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 72 horas.

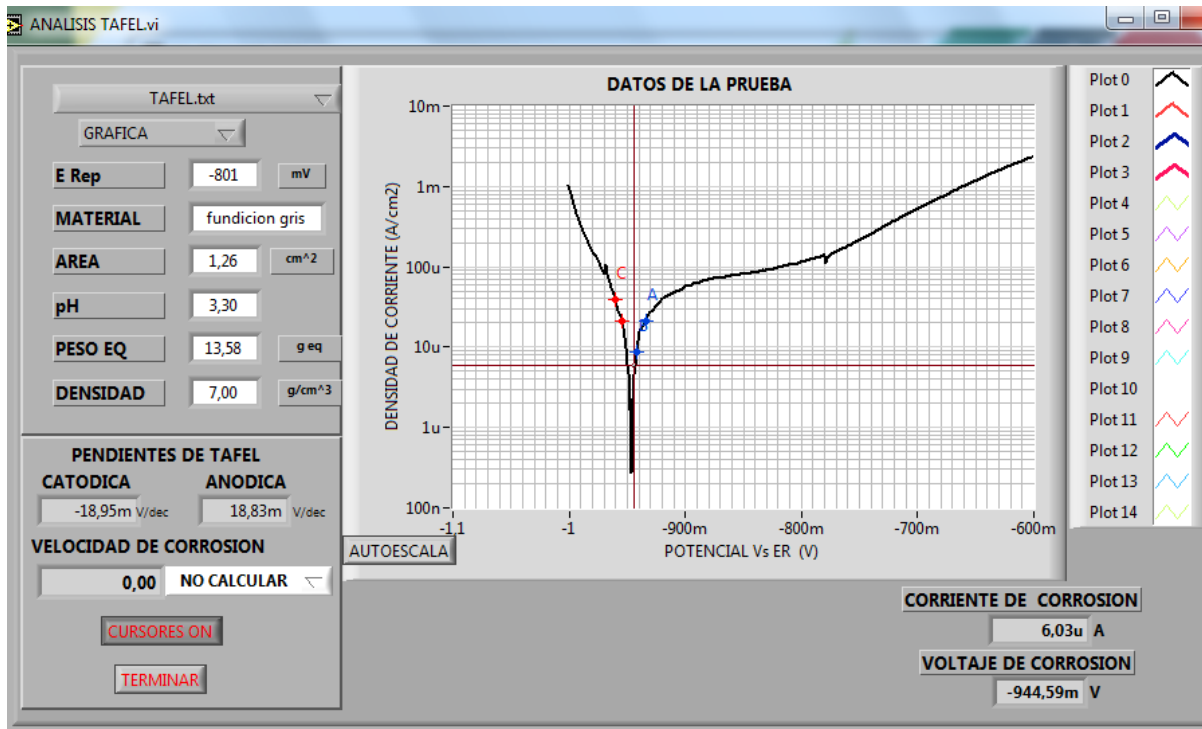


Figura 10. Curva de polarización obtenida de la explosión de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio, para la determinación de las pendientes de Tafel. 96 horas.



A partir de las figuras 8 hasta la figura 10. Y correspondientes a las 24, 48, 72 y 96 horas se observa la presencia de una zona de pasividad antes de los -900mV esta zona es mayor y se acerca a los -950mV entre más horas van pasando. Como podría esperarse, al aumentar el tiempo de concentración del medio, se incrementa la cantidad y tamaño de las oscilaciones presentes en la zona de pasividad causadas por la formación más agresiva de picadura metaestable.

3.3 Análisis estadístico

Una vez realizados los ensayos y trazadas las gráficas correspondientes a las diferentes técnicas electroquímicas, se procedió a realizar los cálculos de la resistencia a la polarización (R_p), necesarios para determinar la velocidad de corrosión V_{corr} .

Después de haber realizado una extensa revisión en la literatura especializada respecto a estos cálculos se encontró que la mayoría de los autores antes de encontrar la velocidad de corrosión determina el peso equivalente del material estudiado de acuerdo a la composición química de estos.

A continuación, se presenta los cálculos realizados del análisis estadístico para la primera toma de 0 horas, en la misma se detalla las fórmulas para calcular R_p , i_{corr} , PE , y la velocidad de corrosión. La resistencia a la polarización se obtiene de la curva de polarización al linealizar la curva hasta obtener un valor de pendiente, dicho valor es nuestro R_p .

$$R_p = 261,66 \text{ OHM}$$

Peso equivalente:

$$PE = N^{eq}$$

El peso equivalente de la fundición gris estudiada se determina de acuerdo a los datos de composición química mostrada en la tabla 1 y según la ecuación 3.

$$N_{eq} = \frac{(3.30)(2)}{12.0107} + \frac{(2.00)(2)}{28.0855} + \frac{(0.8)(2)}{54.938045} + \frac{(0.15)(2)}{30.973762} + \frac{(0.12)(2)}{32.065}$$

$$N_{eq} = 0.738226$$

$$PE = \frac{1}{0.738226} = 1.354565$$



Tomamos los valores de las constantes de Tafel anódica y catódica ($\beta_a=54,03$ $\beta_c=-55,53$ V/década) para luego reemplazarlos y así determinar la constante de proporcionalidad.

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 (\beta_a + \beta_c)} = 1304,472 \text{ V}$$

Para encontrar la densidad de corrosión,

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} = 45,44 \text{ mA}$$

Finalmente encontramos la velocidad de corrosión,

$$V_{corr} = 9,01 \text{ MPY}$$

En la tabla 3. Se mostrarán los cálculos realizados para los tiempos de 24, 48, 72, 96 horas.

Horas	Cte catódica	Cte anódica	<i>i</i>_{corr} (mA)	<i>R</i>_p (OHM)	Velocidad de corrosión (MPY)
24	-28,43	28,02	36,51	337,76	7,24k
48	-30,36	29,93	25,66	255,04	5,09k
72	-19,21	19,76	19,12	221,12	3,79k
96	-18,95	18,83	16,85	243,43	3.34k

Tabla 3. Resultados obtenidos para la determinación de la velocidad de corrosión



4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1. La técnica de resistencia a la polarización utilizada en este trabajo permitió identificar la velocidad de corrosión de una probeta de fundición gris en una solución de 3.5 % de NaCl.
2. Se ha demostrado, mediante empleo de la técnica de resistencia a la polarización, que la aleación objeto de estudio fue susceptible a la corrosión por picadura.
3. Esta técnica utilizada es sencilla y se logran obtener resultados en poco tiempo, aunque este método no es el más efectivo debido a que existen otros más precisos como el método Espectroscopia de impedancia Electroquímica (EIS).
4. Los resultados se lograron obtener controlando un rango de potencial, perturbando al sistema de su potencial de equilibrio a otro valor de potencial anódico.
5. La resistencia a la polarización disminuye conforme aumenta el tiempo de exposición en la solución en la que se realizó la experimentación.



5. RECOMENDACIONES

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones para trabajos futuros siguiendo el mismo enfoque que se ha manejado realizando lo siguiente:

1. Se sugiere que para próximas experimentaciones las probetas estén mayor tiempo de exposición en la solución y se puedan obtener resultados más efectivos.
2. Confirmar la validez de una ecuación de corrección de R_n en función del número de datos, bajo ciertas condiciones:
 - A. Diferentes ecuaciones de ajuste no lineal que mantengan sentido físico.
 - B. Diferentes velocidades de adquisición de los datos
 - C. Empleando diferentes materiales ferrosos y no ferrosos
3. Se deberá realizar cambios de la solución al menos dos ensayos para así evitar la contaminación y esto resulte en una variación de los resultados.
4. Desconectar todo elemento que cause corrientes parasitas y alteren los resultados del potencio/Galvanostato.
5. Realizar otras técnicas electroquímicas que sirvan para el estudio de otros materiales sometidos a medios agresivos.

APENDICE A

Como se dijo anteriormente, sobre una probeta en corrosión tiene lugar en general varias reacciones simultaneas. La curva de mayor interés es la de disolución anódica del metal en estudio, buscando el trazado de la misma, eliminando las otras reacciones que interfieran. Las curvas de polarización trazadas en la fundición gris, en NaCl, presentaban la forma que se ve en las siguientes figuras.

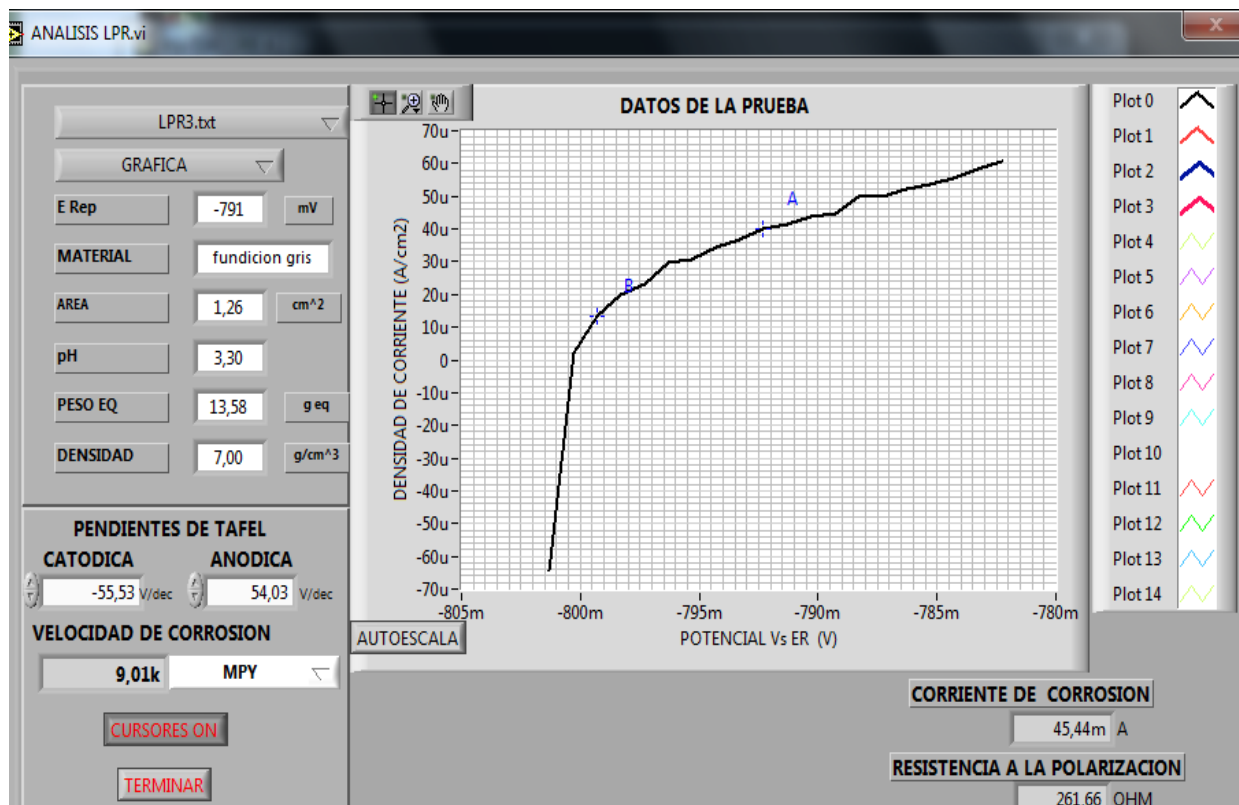


Figura 11. Curva de polarización obtenida de la exposición de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 0 horas.

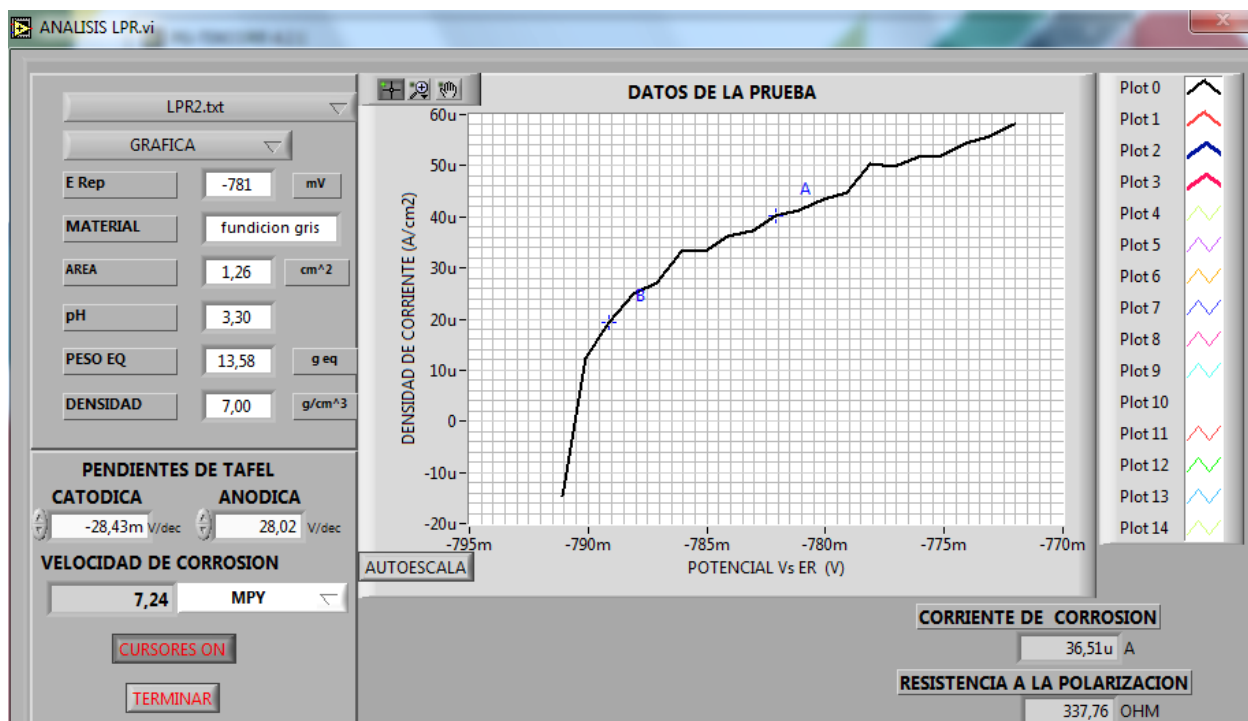


Figura 12. Curva de polarización obtenida de la exposición de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 24 horas.

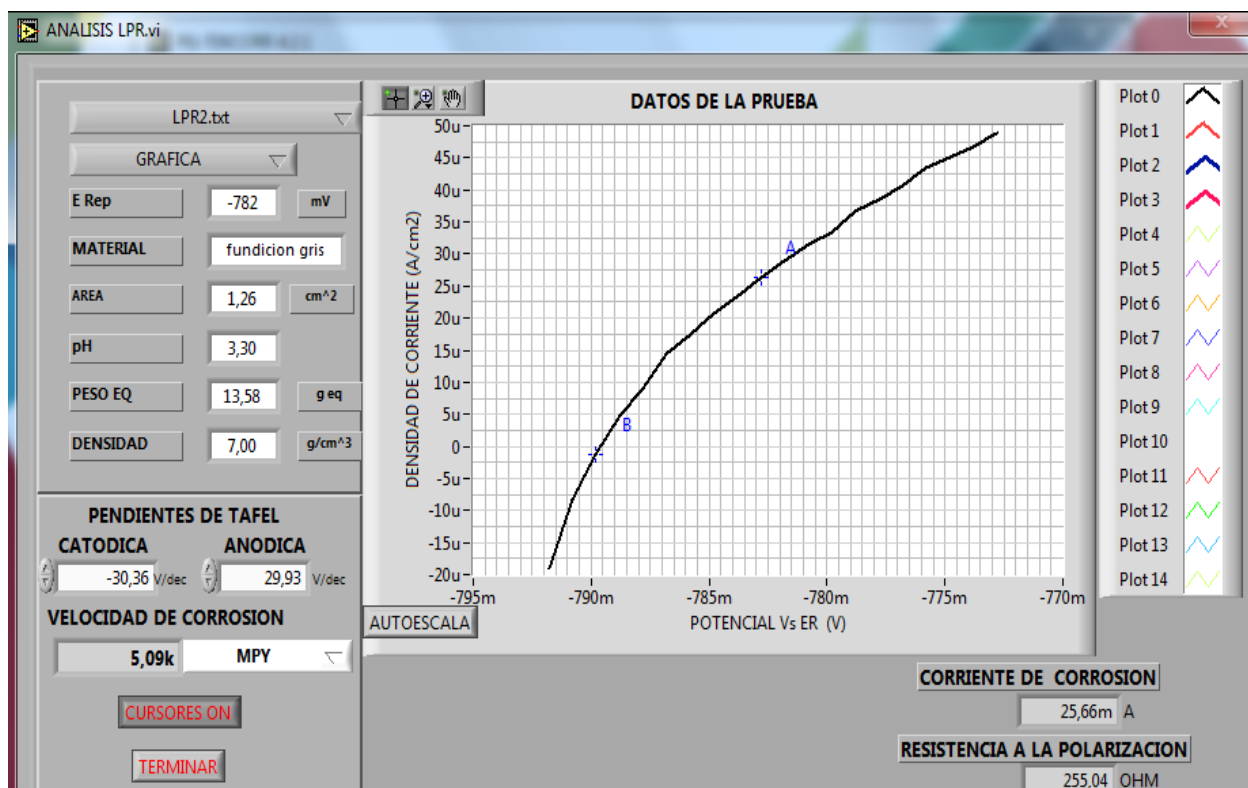


Figura 13. Curva de polarización obtenida de la exposición de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 48 horas.

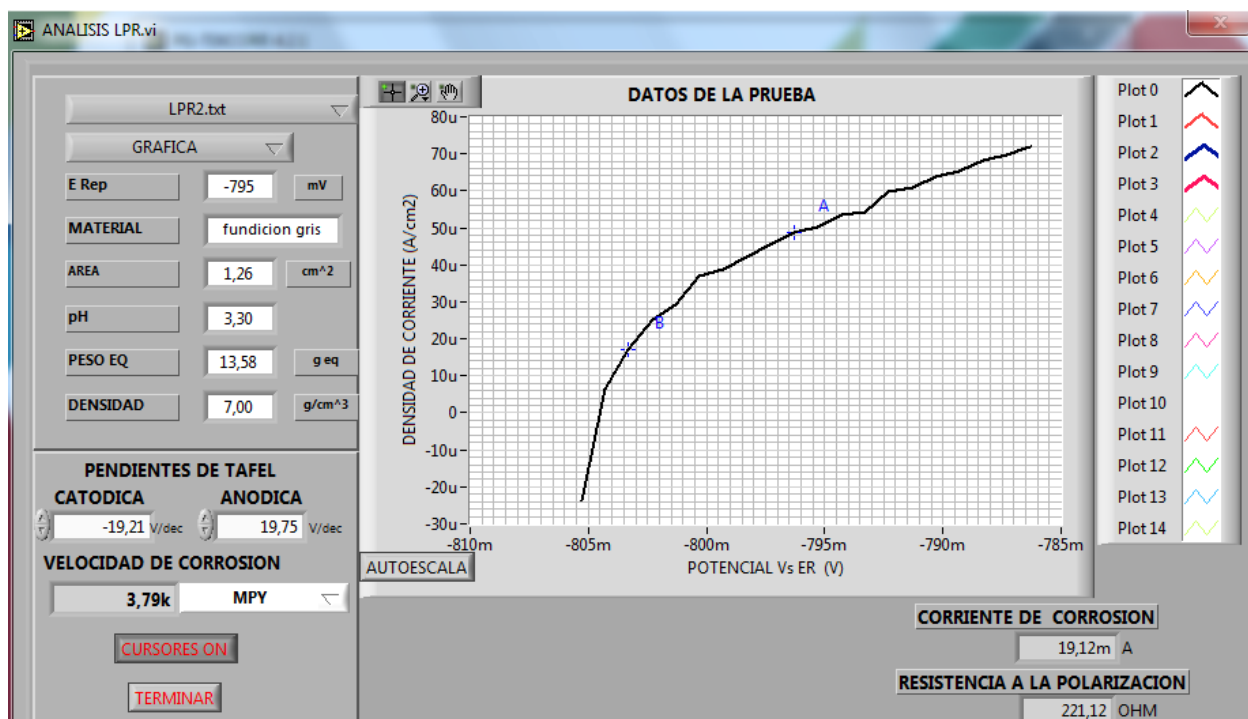


Figura 14. Curva de polarización obtenida de la exposición de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 72 horas.

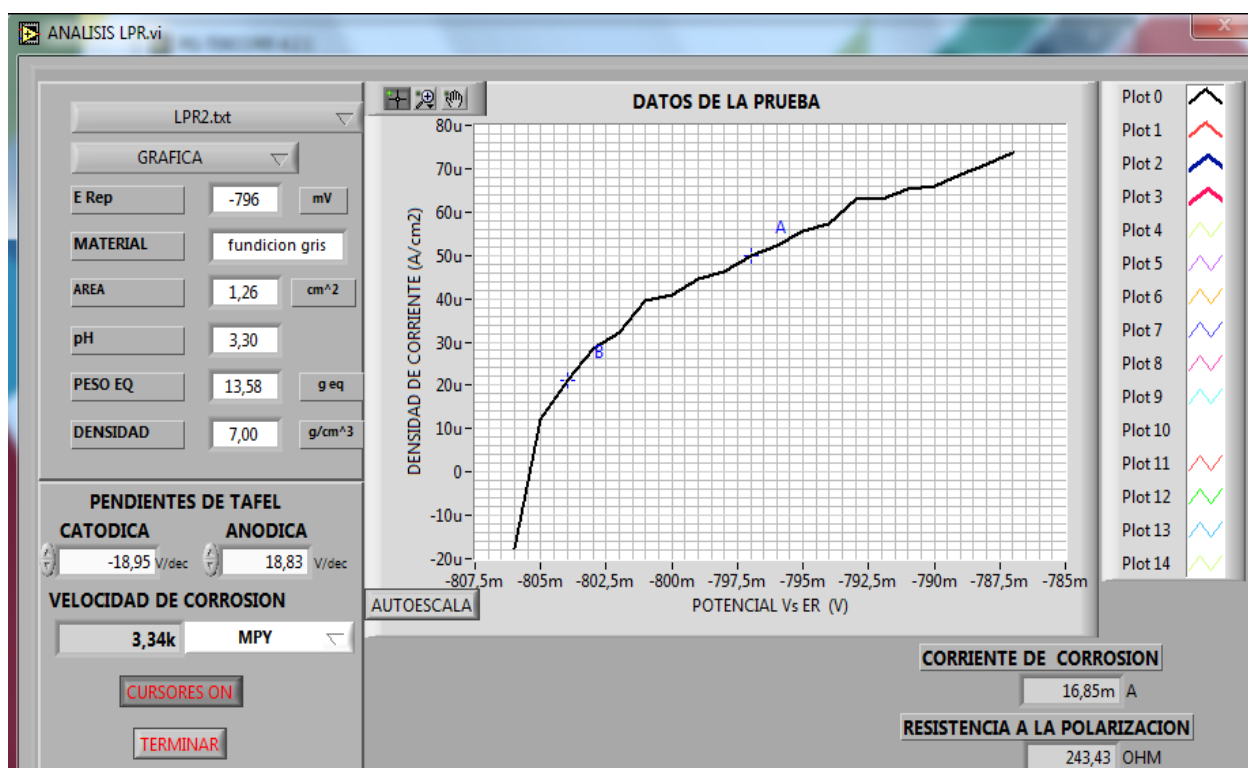


Figura 15. Curva de polarización obtenida de la exposición de la fundición gris a una solución de cloruro de sodio. 96 horas.



Un estudio más cuidadoso de las misma nos demuestra que las curvas estaban compuestas por la suma de:

1. La curva anódica de disolución de la aleación
2. La curva catódica de reducción del oxígeno
3. La curva anódica de desprendimiento de oxígeno

El estudio de curvas de polarización anódica, supone que la densidad de corriente da una medida de velocidad de corrosión del metal. Esto establece que no ocurren otras reacciones simultáneas y que la eficiencia de la electrolisis es 100%.

En caso de dudas, esta eficiencia puede determinarse comparando la densidad de corriente medida, con la velocidad de pérdida de peso del metal, o, con la variación de la concentración de iones metálicos en la solución.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ANALISIS DEL FENOMENO DE LA CORROSION EN MATERIALES DE USO TECNICO: METALES. PROCEDIMIENTOS DE PROTECCION; [en línea]; disponible en: <http://www.eduinnova.es/monografias09/Nov09/Corrosion.pdf>
- [2] M. Morcillo, E. Almeida, B. Rosales, J. Uruchurtu y M. Marrocos; Corrosión y protección en metales en las atmósferas de iberoamerica; Programa CYTED, 1999.
- [3] A. J. Vázquez, J. Damborenea; Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos; CSIC, España, 2000.
- [4] ASTM G 59-91. “Standard practice for conducting potentiodynamic polarization Resistance Measurements”.
- [5] A Neville, T Hodgkiess, H Xu; An electrochemical and microstructural assessment of erosion–corrosion of cast iron, 1999. [\[View Record in Scopus\]](#)
- [6] A. J. Vázquez, J. Damborenea; Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos; CSIC, España, 2000.
- [7] Juan Genescá, Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México, 2002.
- [8] J. A. González Fernández; Control de la Corrosión: Estudio y Medidas por técnicas Electroquímicas. CSIC-CINM; Madrid, España; 1989.
- [9] ASTM G3-89 (Reapproved 2004), Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- [10] Obtención de curvas galvanostaticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A 42 en solución de agua al 3.5% de Cloruro de Sodio.
- [11] FUNDICIÓN GRIS; [en línea]; disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fundición_gris
- [12] ASTM G5-94 (Reapproved 2004), Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- [13] ASTM G59-97 (Reapproved 2003), Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
- [14] Evans U.R. Corrosiones Metálicas. Londres (Inglaterra): Universidad de Cambridge. Editorial Reverté, 1986
- [15] G. Bejarano, J. C. Caicedo, et. al. phys. stat. sol. (c) (2007),



- [16] G. Bejarano, J. C. Caicedo, et. al. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. 2008, 44, 36-42.
- [17] N. J. Carvalho, et al. Thin Solid Films. 2003, 429, 179-189

